

文章编号: 1000-7032(2019)09-1200-07

基于动态门限的幅度调制空间相干光通信系统

孙 鑫^{1*}, 李 林^{2,3}

(1. 长安大学 现代工程训练中心, 陕西 西安 710064;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 提出了基于动态门限的幅度调制空间相干光通信(IM/CD)系统。与传统的幅度调制/直接检测(IM/DD)光通信系统相比,我们提出的系统无需瞬时信道状态信息(CSI)和大气湍流模型的概率密度函数(pdf)就可以实现对信号的高精度检测,与此同时该系统能通过提高本振激光器的功率来获取更好的误码率(BER)性能。此外,本文还推导了该系统平均误码率的表达式。仿真实验表明,当本振激光器和发射信号的归一化幅度为1、平均误码率为 10^{-9} 时,该系统在归一化大气闪烁标准差 $\sigma=0.25$ 、归一化相位噪声标准差 $\sigma_\varphi=0.07$ 的对数正态湍流信道条件下,与理想的自适应探测门限光通信系统相比,其信噪比性能损失仅为1.4 dB。

关 键 词: 自由空间光通信; 动态门限; 相干探测

中图分类号: TN929.12

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20194009.1200

Free-space Coherent Optical Communication System Using Irradiance Modulation with Dynamic Detection Threshold

SUN Xin^{1*}, LI Lin^{2,3}

(1. Modern Engineering Training Center, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding Author, E-mail: sunxin0529@163.com

Abstract: Free-space coherent optical communication system using irradiance modulation(IM/CD) with dynamic detection threshold is proposed. Compared with traditional irradiance modulation and direct detection(IM/DD) systems, the system we proposed can detect the signal without requiring the knowledge of instantaneous channel state information(CSI) and the probability density function(pdf) of the turbulence model and achieve better average bit error rate(BER) just by only improving the LO power. Analytical expressions are derived for the average bit error rate of the system. Numerical studies show that the proposed system can achieve comparable performance to the idealized adaptive detection system, with a signal-to-noise ratio performance loss of only 1.4 dB at a BER of 10^{-9} for a lognormal turbulence channel with $\sigma=0.25$ and phase noise with $\sigma_\varphi=0.07$ when the local oscillator(LO) amplitude and transmitting amplitude are assumed to be unity.

Key words: free-space optical communications; dynamic detection threshold; coherent detection

收稿日期: 2019-03-06; 修订日期: 2019-04-16

基金项目: 国家自然科学基金(11403064)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(11403064)

1 引言

近年来,随着科技的发展,激光技术有了广泛的应用^[1-7]。在这些应用中,无线激光通信技术由于其具有高传输速率、高安全性、无需频带许可等优点,获得了广泛的关注^[8-11]。然而,由于大气湍流所引起的衰落的影响,其通信链路的性能会大大降低^[12-15]。在这一过程中接收端接收到的信号的幅值和相位都会产生很大畸变,从而使得传统光通信系统的误码率性能急剧恶化。

为了在较低的复杂度下获得更好的误码率性能,一些研究将重点放在了自适应动态门限上。之前的部分研究倾向于假设接收机已知大气衰落的瞬时值,并使用信道状态信息(CSI)对信号进行检测^[16-19]。然而在现实中,接收机很难获得瞬时信道状态信息(CSI)。在参考文献[20]中,作者们利用冗余的帧头导航序列来减轻大气湍流的干扰,进而提高系统性能。但是这一方法由于需要先对整个序列进行存储,然后再进行处理,因而会引入延迟。此外,该方法仍需要信道概率密度函数的辅助来实现。

为了解决以上问题,本文首先提出了一种基于动态门限的幅度调制空间相干光通信(IM/CD)方案。该方案无需瞬时信道状态信息和大气湍流模型的概率密度函数就可以实现对信号的高精度检测,与此同时该方案亦能通过提高本振激

光器的功率来获取更好的误码率性能。此外,为了进一步研究其性能,本文推导了该方案平均误码率的表达式。实验结果表明该方案可以在较低的复杂度下获得较好的误码率性能。

2 系统结构

系统结构如图1所示。系统发射端利用一个马赫-曾德尔调制器(MZM)来调制激光光束。调制器的同向(I路)和正交(Q路)支路被用来发送两个不同的特殊信息序列。其中,这两个序列通过一定的编码规则来确保在每一个码元周期内至少有一个支路发送“1”。

如图2所示,为了获取这两个特殊序列,我们首先将一个长度为3的二进制码组转换为一个长度为2的三进制码组。这一映射可以表示为:

$$\{0,1\}^3 \rightarrow \{0,1,2\}^2, \quad (1)$$

然后我们再将得到的三进制码组中的每一个元素转换为一个长度为2且不包含“00”状态的二进制序列。其具体的映射规则为:三进制码组中所包含的3种元素(0,1,2)分别对应{01,10,11}3个二进制序列。最后将得到的二进制序列通过串行-并行转换后发送到调制器的两条支路,并将经调制后的光信号通过镜头发射出去。这一过程可以表示为:

$$\{0,1,2\}^2 \rightarrow \{0,1\}^4. \quad (2)$$

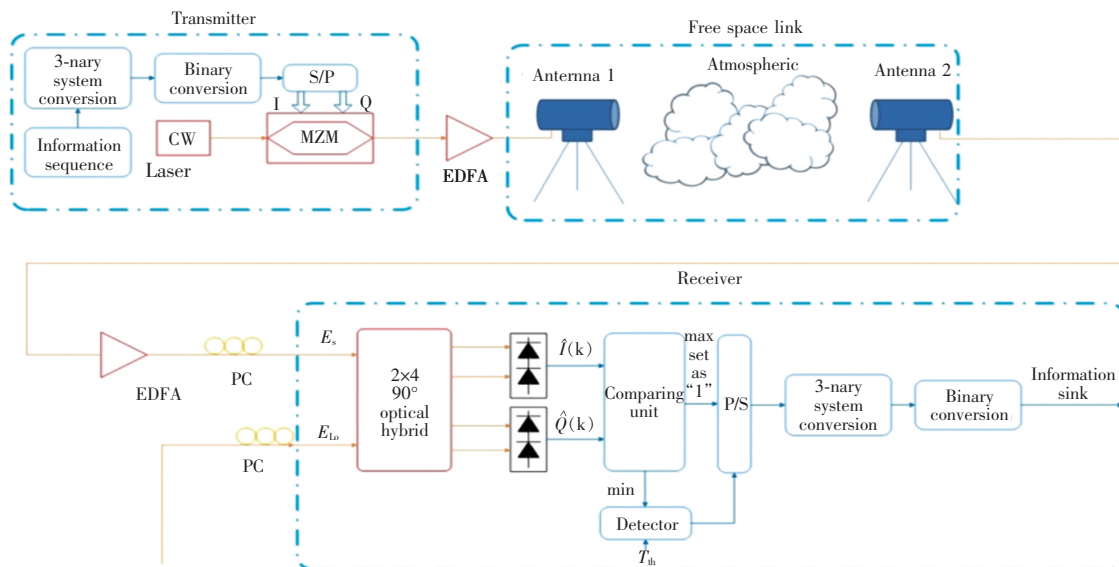


图1 系统结构模型。

Fig.1 Structure of the system model

上文所述的映射过程可以保证接收端在每一个码元周期内都能够获得一个较为准确的大气湍

流衰减的参考。这是由于在每一个码元周期内,发送端至少有一条支路发送信号“1”。而每一个

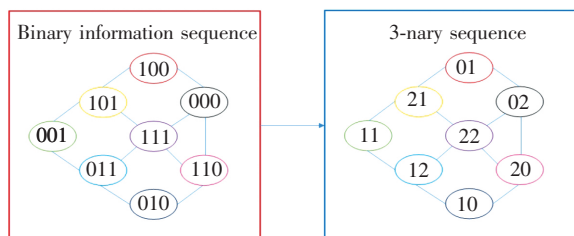


图 2 二进制码组到三进制码组映射图

Fig. 2 Diagram of mapping binary code groups to 3-nary code groups

被发送的信号“1”都会受到大气湍流的影响,因而其可以被视为大气湍流衰减的参考。

在接收端,如图 1 所示,首先利用一个掺铒光纤放大器(EDFA)对接收信号进行放大,然后将经放大后的信号 E_s 送入零差相干接收机进行探测。在这一过程中本振光 E_{LO} 和经放大后的接收信号光 E_s 的偏振态由偏振控制器来保证。接收信号光 E_s 和本振光 E_{LO} 在 $2 \times 4 \ 90^\circ$ 光混频器中进行混频,其输出的光信号被两个平衡探测器(BD)转化为电信号供后续模块处理。在每个码元周期内,后续处理模块首先将平衡探测器输出电信号中信号幅值较大的支路设为“1”,然后将该支路信号幅值大小的一半设为另一条支路的判决门限,并对另一条支路进行判决。判决后的信号经过并行-串行转换后被送入三进制转换单元。该单元将 4 位二进制序列转换为长度为 2 的三进制码组,并将得到的三进制码组送入二进制转换单元。最终二进制转换单元将三进制码组映射回长度为 3 的二进制码组以获得信宿。

在发射端,发射信号可以被表示为:

$$S(t) = E_1 [A(t) \cos(2\pi f_c t) + B(t) \sin(2\pi f_c t)], \quad (3)$$

其中 E_1 代表发送信号的幅值, $A(t), B(t) \in \{0, 1\}$ 为两条支路中的数据, f_c 代表发送载波频率。两条支路的信号幅值经大气信道传播后会发生畸变,这一过程可以视为一个乘性的随机过程 $I(t)$ 。这里我们假设两条支路在同一时刻所受到的大气衰落影响是相同的。这是由于两条支路波长相同且光路重叠^[21]。

所以在接收端经过平衡探测器后的输出信号可以表示为:

$$y_1(t) = RE_1 E_{LO} I(t) \cdot [A(t) \cos(\varphi_n) + B(t) \sin(\varphi_n)] + n_1(t),$$

$$y_2(t) = RE_1 E_{LO} I(t) \cdot$$

$$[B(t) \cos(\varphi_n) + A(t) \sin(\varphi_n)] + n_2(t), \quad (4)$$

其中 E_{LO} 代表本振光幅值, φ_n 代表大气引入的相位噪声, R 代表探测器响应度,这里我们假设 $R = 1$ 。在公式(4)中, $I(t)$ 代表由大气湍流所引起的光信号幅值抖动的随机过程, $n_1(t)$ 和 $n_2(t)$ 则代表接收机中两条支路由热噪声和散粒噪声综合而成的高斯白噪声。这里我们设该噪声的功率为 σ_g^2 。

3 系统平均误码率分析

在本章中,我们推导了本系统的平均误码率。为了便于说明,我们首先推导当发射端发送三进制符号 b_j 时,接收端判决结果为三进制符号 $\hat{b}_j$ 时的条件概率 $P(\hat{b}_j | b_j)$,然后再推导系统整体的误码率。

3.1 当发射端发送三进制符号 b_j 时,接收端判决

结果为三进制符号 $\hat{b}_j$ 时的条件概率 $P(\hat{b}_j | b_j)$

由上文可知,系统的判决门限随发射端发送的三进制符号的变化而变化。当发射端发送“0”时,系统的判决门限为:

$$T_{th}(0) = \frac{\max\{I(t) \sin(\varphi_n) + n_1(t), I(t) \cos(\varphi_n) + n_2(t)\}}{2}, \quad (5)$$

当发射端发送“1”时,系统的判决门限为:

$$T_{th}(1) = \frac{\max\{I(t) \cos(\varphi_n) + n_1(t), I(t) \sin(\varphi_n) + n_2(t)\}}{2}, \quad (6)$$

当发射端发送“2”时,系统的判决门限为:

$$T_{th}(2) = \frac{1}{2} \max \left\{ \sqrt{2} I(t) \cos\left(\varphi_n - \frac{\pi}{4}\right) + n_1(t), \sqrt{2} I(t) \cos\left(\varphi_n - \frac{\pi}{4}\right) + n_2(t) \right\}, \quad (7)$$

所以条件概率 $P(\hat{b}_j | b_j)$ 可以通过计算发射端发射的二进制符号在接收端的误判概率获得。受篇幅长度所限,这里我们仅推导条件概率 $P(0 | 0)$ 。条件概率 $P(0 | 0)$ 可以表示为:

$$P(0 | 0) = E_I \left[E_{\varphi_n} \left[P \left(I(t) \cos(\varphi_n) + n_2(t) > I(t) \sin(\varphi_n) + n_1(t) \cap \frac{I(t) \cos(\varphi_n) + n_2(t)}{2} > \right) \right] \right]$$

$$I(t) \sin(\varphi_n) + n_1(t) | I \varphi_n] \quad (8)$$

其中 $E[\bullet]$ 和 $E_{\varphi_n}[\bullet]$ 代表对 I 和 φ_n 求期望。

3.2 系统平均误码率

在发射端,首先将二进制码组 $a_3 a_2 a_1$ 码组转换为三进制码组 $b_2 b_1$, 随后将得到的 $b_2 b_1$ 映射为长度为4的二进制序列。在接收端经判决后我们又将长度为4的二进制序列映射回三进制码组 $\hat{b}_2 \hat{b}_1$ 。最终三进制码组 $\hat{b}_2 \hat{b}_1$ 又被转换回二进制码组 $\hat{a}_3 \hat{a}_2 \hat{a}_1$ 。

为了计算接收端输出的二进制码组 $\hat{a}_3 \hat{a}_2 \hat{a}_1$ 的错误概率,我们首先将其映射回三进制码组 $\hat{b}_2 \hat{b}_1$ 并计算其条件概率。由于接收端与发射端的三进制码组 $\hat{b}_2 \hat{b}_1$ 、 $b_2 b_1$ 中的元素是相互独立的,所以条件概率 $P(\hat{b}_2 \hat{b}_1 | b_2 b_1)$ 可以表示为:

$$P(\hat{b}_2 \hat{b}_1 | b_2 b_1) = \prod_{j=1}^2 P(\hat{b}_j | b_j) = \prod_{j=1}^2 P(\hat{b}_j | b_j), \quad (9)$$

其中条件概率 $P(\hat{b}_j | b_j)$ 已在前文中给出。

所以条件概率 $P(\hat{a}_3 \hat{a}_2 \hat{a}_1 | a_3 a_2 a_1)$ 可以表示为:

$$P(\hat{a}_3 \hat{a}_2 \hat{a}_1 | a_3 a_2 a_1) = \prod_{j=1}^2 P(\hat{b}_j | b_j), \quad (10)$$

因此,当发射端的信源码组为 $a_3 a_2 a_1$ 、接收端的信宿码组 $\hat{a}_3 \hat{a}_2 \hat{a}_1$ 时,出现误码的概率 $P(e | a_3 a_2 a_1, \hat{a}_3 \hat{a}_2 \hat{a}_1)$ 为:

$$P(e | a_3 a_2 a_1, \hat{a}_3 \hat{a}_2 \hat{a}_1) = \frac{\sum_{l=1}^3 a_l \oplus \hat{a}_l}{3}, \quad (11)$$

其中 $\oplus$ 代表异或运算。因此系统的平均误码率可以表示为

$$\begin{aligned} P(e) &= \sum_{a_3 a_2 a_1 \hat{a}_3 \hat{a}_2 \hat{a}_1} P(e | a_3 a_2 a_1, \hat{a}_3 \hat{a}_2 \hat{a}_1) \times P(a_3 a_2 a_1, \hat{a}_3 \hat{a}_2 \hat{a}_1) = \\ &= \sum_{a_3 a_2 a_1 \hat{a}_3 \hat{a}_2 \hat{a}_1} \frac{\sum_{l=1}^3 a_l \oplus \hat{a}_l}{3} \times P(a_3 a_2 a_1, \hat{a}_3 \hat{a}_2 \hat{a}_1) = \\ &= \sum_{a_3 a_2 a_1 \hat{a}_3 \hat{a}_2 \hat{a}_1} \frac{\sum_{l=1}^3 a_l \oplus \hat{a}_l}{3} \times \\ &P(\hat{a}_3 \hat{a}_2 \hat{a}_1 | a_3 a_2 a_1) P(a_3 a_2 a_1), \quad (12) \end{aligned}$$

在公式(12)中,由于 $a_3 a_2 a_1$ 中的元素相互独立,

所以我们可知 $P(a_3 a_2 a_1) = 1/2^3$ 。

将公式(10)代入公式(12),可得到

$$\begin{aligned} P(e) &= \sum_{a_3 a_2 a_1 \hat{a}_3 \hat{a}_2 \hat{a}_1} \frac{\sum_{l=1}^3 a_l \oplus \hat{a}_l}{3} \times \\ &\prod_{j=1}^2 P(\hat{b}_j | b_j) P(a_3 a_2 a_1) = \\ &\frac{1}{2^3} \sum_{a_3 a_2 a_1 \hat{a}_3 \hat{a}_2 \hat{a}_1} \frac{\sum_{l=1}^3 a_l \oplus \hat{a}_l}{3} \prod_{j=1}^2 P(\hat{b}_j | b_j). \quad (13) \end{aligned}$$

4 实验仿真结果

我们对本文所提出的系统的误码率进行了仿真。为了叙述方便,我们用 P_t 表示系统发射功率、 P_r 表示接收端本振激光器功率。同时我们认为大气湍流所引入的随机衰落过程服从对数正态分布。此外,我们假设信号由于在大气中远距离传输所产生的衰减是固定的,且可以被接收端的 EDFA 补偿。

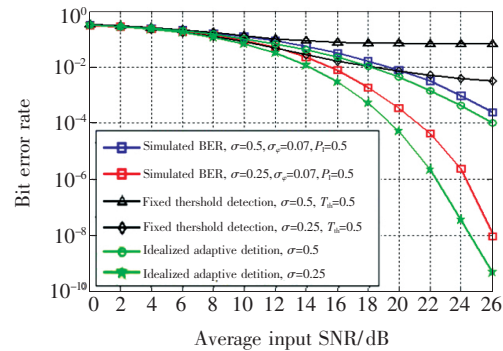


图3 各系统在不同的大气湍流条件下的仿真误码率

Fig. 3 Simulated BERs of different systems over different turbulence channels

图3为理想自适应判决门限系统(绿线)、固定门限系统(黑线)与本文所提出的系统(蓝、红线)在 $\sigma=0.5$ 、 $\sigma=0.25$ 、 $\sigma_\varphi=0.07$ 的大气湍流条件下的仿真误码率曲线。为了保证各系统的总功率相同,我们设理想自适应判决门限系统和固定门限系统的发射功率 P_t 为1。同时我们设基于动态门限的幅度调制空间相干光通信系统的发射功率 P_t 以及本振激光器功率 P_r 为0.5。此外,我们假设固定门限系统的判决门限 $T_{th}=0.5$ 。从图中可以看到固定门限系统在大信噪比的区域出现了误码率饱和现象,而本文所提出的系统消除了这种现象。此外,从图中我们还可以看到理想自

适应判决门限系统在 $\sigma = 0.25$ 的大气湍流条件下,需要 25.6 dB 的信噪比来达到 10^{-9} 的误码率,而本文提出的系统也只需要 27 dB 的信噪比来达到相同的误码率。因此本系统在该误码率和大气湍流条件下与理想化的自适应判决门限系统相比仅存在 1.4 dB 的信噪比差距。

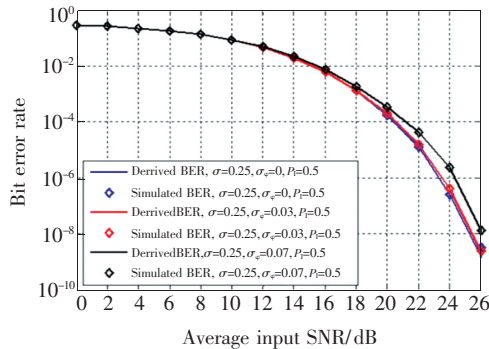


图 4 基于动态门限的幅度调制空间相干光通信系统在不同相位噪声下的理论推导及仿真误码率

Fig. 4 Derived BERs and simulated BERs of the coherent optical communication system using irradiance modulation with dynamic detection threshold over different phase noise

图 4 为本文所提出的系统在相位噪声标准差 σ_φ 不同的湍流条件下的理论及仿真误码率曲线。为了方便说明,我们假设发射端发射功率与本振激光器功率均为 0.5、大气的闪烁标准差为 0.25。从图中可知,系统误码率的理论推导值与仿真结果十分吻合。此外,系统的误码率会随着 σ_φ 的上升而逐渐恶化,但同时当 σ_φ 足够小时($\sigma_\varphi = 0.03$),系统的误码率性能与不考虑大气所引入的相位噪声时的误码率性能极为接近。

图 5 展示了本文所提出的系统在不同的大气湍流条件下使用不同的本振激光器功率时的理论推导及仿真误码率。为了能更好地说明问题,我们设 $\sigma = 0.25$, $P_i = 0.5$ 。由图 5 可知系统的误码

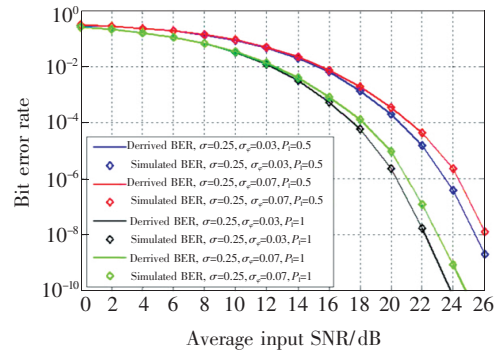


图 5 基于动态门限的幅度调制空间相干光通信系统在不同的大气湍流条件下使用不同的本振激光器功率时的理论推导及仿真误码率

Fig. 5 Derived BERs and simulated BERs of the coherent optical communication system using irradiance modulation with dynamic detection threshold and different LO power over different turbulence channel

率性能随着本振激光器功率的提升而变得更好。当我们将本振激光器功率提高 1 倍时,误码率曲线整体向左移了 3 dB。这是由于随着本振激光器功率的提高,系统的输出信噪比也得到了提升。换言之,该系统可以通过提高本振激光器功率的方法来提高系统的探测灵敏度。这一特性十分有利于该系统在诸如卫星通信等发射光功率较低的场景下应用。

5 结 论

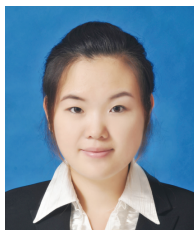
本文提出了基于动态门限的幅度调制空间相干光通信系统。实验表明,该系统无需瞬时信道状态信息和大气湍流模型的概率密度函数的辅助就可以达到较好的误码率性能。此外,本文还推导了该系统平均误码率的表达式。仿真实验表明,该系统以较低的复杂度实现了与理想自适应判决门限系统相当的性能,且理论推导与仿真结果相符。因此,该系统有助于自由空间光通信的实现和性能提升。

参 考 文 献:

- [1] HOU L F, ZHANG L, KIM J. Energy modeling and power measurement for mobile robots [J]. *Energies*, 2019, 12(1): 27.
- [2] 马爽, 吴志勇, 高世杰, 等. 改进的大气激光通信 PPM 调制解调系统设计 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(5): 105-109.
MA S, WU Z Y, GAO S J, et al.. Design of modified atmospheric laser communication PPM modulation-demodulation system [J]. *J. Harbin Inst. Technol.*, 2016, 48(5): 105-109. (in Chinese)
- [3] 付强, 姜会林, 王晓曼, 等. 空间激光通信研究现状及发展趋势 [J]. 中国光学, 2012, 5(2): 116-125.
FU Q, JIANG H L, WANG X M, et al.. Research status and development trend of space laser communication [J]. *Chin.*

- Opt.*, 2012, 5(2): 116-125. (in Chinese)
- [4] 高铎瑞,李天伦,孙悦,等. 空间激光通信最新进展与发展趋势 [J]. 中国光学, 2018, 11(6): 901-913.
GAO D R, LI T L, SUN Y *et al.*. Latest developments and trends of space laser communication [J]. *Chin. Opt.*, 2018, 11(6): 901-913. (in Chinese)
- [5] 曾飞,高世杰,伞晓刚,等. 机载激光通信系统发展现状与趋势 [J]. 中国光学, 2016, 9(1): 65-73.
ZENG F, GAO S J, SAN X G *et al.*. Development status and trend of airborne laser communication terminals [J]. *Chin. Opt.*, 2016, 9(1): 65-73. (in Chinese)
- [6] 韩旭东,徐新行,刘长顺,等. 用于星载激光通信终端的绝对式光电角度编码器 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(10): 2424-2431.
HAN X D, XU X H, LIU C S *et al.*. Absolute optical angle encoder used for laser communication terminal on satellite platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10): 2424-2431. (in Chinese)
- [7] 高世杰,盛磊,吴志勇,等. 大气激光通信光斑图像的快速复原与实时检测 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(8): 2393-2399.
GAO S J, SHENG L, WU Z Y *et al.*. Rapid restoration and real-time detection on spot image of atmospheric laser communication [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(8): 2393-2399. (in Chinese)
- [8] LI X L, GENG T W, MA S *et al.*. Performance improvement of coherent free-space optical communication with quadrature phase-shift keying modulation using digital phase estimation [J]. *Appl. Opt.*, 2017, 56(16): 4695-4701.
- [9] LI L, GENG T W, WANG Y *et al.*. Free-space optical communication using coherent detection and double adaptive detection thresholds [J]. *IEEE Photon. J.*, 2019, 11(1): 7900217.
- [10] 涂焱阳,吴志勇,马爽,等. 阈值可变的高速光通信脉冲位置调制的帧同步 [J]. 中国激光, 2017, 44(11): 1106008-1-8.
TU Y Y, WU Z Y, MA S *et al.*. Frame synchronization of pulse position modulation in high-speed optical communication with variable threshold [J]. *Chin. J. Lasers*, 2017, 44(11): 1106008-1-8. (in Chinese)
- [11] LI Y T, GUO S A, GENG T W *et al.*. Evaluation on the capacity and outage performance of the free space optical system impaired by timing jitters over an aggregate channel [J]. *Opt. Eng.*, 2017, 56(7): 076108.
- [12] 陈纯毅,杨华民,姜会林,等. 大气光通信中大孔径接收性能分析与孔径尺寸选择 [J]. 中国激光, 2009, 36(11): 2957-2961.
CHEN C Y, YANG H M, JIANG H L *et al.*. Performance analysis of large-aperture receiving and selection of aperture size in atmospheric optical communications [J]. *Chin. J. Lasers*, 2009, 36(11): 2957-2961. (in Chinese)
- [13] 谢伟良,汤俊雄. 基于 Turbo 码的大气无线光通信系统特性分析 [J]. 中国激光, 2003, 30(9): 835-838.
XIE W L, TANG J X. Analysis on characterization of atmospheric optical wireless communication system based on Turbo code [J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, 30(9): 835-838. (in Chinese)
- [14] 高宠,马晶,谭立英,等. 大气光通信中大气闪烁时间平滑效应研究 [J]. 光学学报, 2006, 26(4): 481-486.
GAO C, MA J, TAN L Y *et al.*. Time-averaging effects for atmospheric scintillation in atmospheric optical communication [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2006, 26(4): 481-486. (in Chinese)
- [15] 陈纯毅,杨华民,姜会林,等. 大气光通信中大气湍流影响抑制技术研究进展 [J]. 兵工学报, 2009, 30(6): 779-791.
CHEN C Y, YANG H M, JIANG H L *et al.*. Research progress of mitigation technologies of turbulence effects in atmospheric optical communication [J]. *Acta Armam.*, 2009, 30(6): 779-791. (in Chinese)
- [16] SIMON M K, VILNROTTER V A. Alamouti-type space-time coding for free-space optical communication with direct detection [J]. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 2005, 4(1): 35-39.
- [17] HAAS S M, SHAPIRO J H. Capacity of wireless optical communications [J]. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 2003, 21(8): 1346-1357.
- [18] JAZAYERIFAR M, SALEHI J A. Atmospheric optical CDMA communication systems via optical orthogonal codes [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 2006, 54(9): 1614-1623.
- [19] UYSAL M, LI J, YU M. Error rate performance analysis of coded free-space optical links over gamma-gamma atmospheric turbulence channels [J]. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 2006, 5(6): 1229-1233.

- [20] MORADI H, REFAI H H, LOPRESTI P G. Thresholding-based optimal detection of wireless optical signals [J]. *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Network.*, 2010 2(9): 689-700.
- [21] KHALIGHI M A, XU F, JAAFAR Y *et al.*. Double-laser differential signaling for reducing the effect of background radiation in free-space optical systems [J]. *J. Opt. Commun. Network.*, 2011 3(2): 145-154.



孙鑫(1987 -),女,吉林省吉林市人,硕士,工程师,2013年于吉林大学获得硕士学位,主要从事电工电子方向的研究。

E-mail: sunxin0529@163.com